

УДК 533.6.013.11

С.А.ГРЯЗНОВА, С.А.КАЛКАМАНОВ, д-р техн. наук,

Н.В.ХВОРОСТ, д-р техн. наук

*Харьковская национальная академия городского хозяйства***МЕТОД РАСЧЕТА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ «ТОННЕЛЬ – ПОЕЗД»**

Разработан метод расчета сопротивления воздушной среды при движении поезда в тоннеле. Метод учитывает влияние вентиляционных потоков и нестационарный характер изменения циркуляционных потоков в тоннеле на величину сопротивления. В качестве примера приведены результаты расчетов зависимостей сопротивления воздушной среды от скорости движения состава для различных значений коэффициентов местных сопротивлений метрополитенов.

Розроблено метод розрахунку опору повітряного середовища при русі потягу в тунелі. Метод враховує вплив вентиляційних потоків і нестационарний характер зміни циркуляційних потоків в тунелі на величину опору. Як приклад наведено результати розрахунків залежностей опору повітряного середовища від швидкості руху складу для різних значень коефіцієнтів місцевих опорів метрополітенів.

The method of calculation of resistance of air environment is developed at motion of train in a tunnel. A method takes into account influencing of venting streams and unstationary character of change of circulations streams in a tunnel on the size of resistance. As an example the results of calculations of dependences of resistance of air environment are resulted from the rate of movement of composition for the different values of coefficients of local resistances of underground passages.

*Ключевые слова:* сопротивление воздушной среды, местные гидравлические сопротивления.

Рост экономики неразрывно связан с возрастанием интенсивности транспортных и пассажирских перевозок. В инфраструктуре крупнейших городов важное место занимают метрополитены. Развитие транспортных средств предполагает необходимость изучения комплекса вопросов по их аэродинамике. Решение этой задачи становится особенно важным в связи с широким строительством метрополитенов и нового подвижного состава для них.

Исследованием вопросов аэродинамики рельсовых транспортных средств, включая метрополитены, в разное время занимались Абрамович Г.Н., Радченко В.Д., Цодиков В.Я. [1-4]. В этих работах рассмотрены в основном отдельные стороны проблемы взаимодействия подземных транспортных средств с воздушной средой. В то же время многообразие задач, возникающих при усовершенствовании подвижных транспортных средств, противоречивость многих требований приводит к необходимости комплексного рассмотрения задач аэродинамики транспортных средств.

Целью данной работы являются: анализ методов моделирования

процессов взаимодействия воздушной среды с подвижными транспортными средствами; постановка задачи и усовершенствование метода расчета аэродинамических характеристик подземных транспортных средств.

В настоящее время известно несколько инженерных методов расчета сопротивления воздушной среды при движении поезда в тоннеле [1-4], основанные на применении теории течения в трубопроводах. Эти методы позволяют определить влияние условий движения на величину сопротивления, выявить зависимость сопротивления от различных параметров подвижного состава и тоннеля, что дает возможность оценить в первом приближении экономическую целесообразность конструктивных изменений подвижного состава и тоннеля. Однако указанные методы содержат много допущений, которые искажают полную картину аэродинамики подвижных транспортных средств.

Наиболее распространенной в практике инженерных расчетов является метод, предложенный Абрамович Г.Н. [1], в котором сопротивление воздушной среды в тоннеле определяется как произведение сопротивления воздуха движению состава вне тоннеля (на открытой трассе) на коэффициент, величина которого зависит от габаритов тоннеля и внешней формы поезда. Из приведенных в работе [1] расчетов видно, что величина воздушного сопротивления отличается от опытных данных на 20%. Сравнение расчетных данных воздушного сопротивления с опытными данными, приведенными в работе [4], показывает, что максимальная величина расхождений достигает 35%.

Недостаточная точность расчетных данных обусловлены допущениями, использованными при выводе формулы сопротивления: коэффициенты трения воздуха о стенки тоннеля приняты без учета шероховатости стен, а сопротивление трения воздушного потока о стенки вагона определяется без учета неравномерности скорости этого потока в зазоре между поездом и стенками тоннеля.

С целью приближения расчетных данных к опытным в работе [2] сделана попытка уточнить метод, предложенный Абрамовичем Г.Н., для расчета воздушного сопротивления поезда в тоннеле. При этом предложенное Радченко В.Д. уточнение формулы для подсчета сопротивления воздушной среды при движении поезда в тоннеле касается только полуэмпирических коэффициентов.

Анализ показывает, что основными недостатками описанных выше методов являются допущения о стационарности потока и пренебрежение вентилиационными потоками в тоннеле.

Исследованию взаимовлияния вентилиационных и циркуляционных потоков воздуха в тоннеле метрополитена посвящены работы Цодико-

ва В.Я. [3, 4]. При движении поездов по однопутному тоннелю и при работе принудительной системы тоннельной вентиляции по продольной схеме направление вентиляционных потоков воздуха  $G_{вент}$  совпадает с направлением движения поездов и циркуляционных потоков  $G_{ц}$ . При этом на участке тоннеля между приточной и вытяжной вентиляционными установками по ходу движения поездов происходит сложение циркуляционных потоков воздуха с вентиляционными – наружными, принудительно поданными в тоннель. На участке тоннеля между вытяжной и приточной вентиляционными установками по ходу движения поездов происходит вычитание вентиляционных потоков, удаляемых на поверхность вытяжной вентиляционной установкой, от суммарного количества воздуха. В продвижении воздуха по тоннелю участвуют также приточные и вытяжные установки тоннельной вентиляции, работающие по продольной схеме. В работах [3, 5] показано, что вентиляционные потоки оказывают существенное влияние на суммарное течение воздушных масс в тоннеле метрополитена и они должны быть учтены при анализе сопротивления подземного транспорта. Необходимо отметить, что в работах Цодикова В.Я. объект исследования представляет собой изолированный тоннель бесконечной длины, а сам метод расчета основного сопротивления учитывает только стационарное течение воздуха.

Таким образом, анализ существующих инженерных методов расчета аэродинамических характеристик «вагон - тоннель» показывает, что основными недостатками описанных выше работ являются допущения о стационарности потока и пренебрежение вентиляционными потоками в тоннеле.

Рассмотрим движение электропоездов в метрополитене. Примем следующие допущения.

1. Воздух, участвующий в циркуляционном потоке внутри тоннеля, несжимаемый. Справедливость данного допущения в некоторой степени подтверждается следующей оценкой: максимальная скорость поезда в метрополитене около 90 км/ч, что, для случая движения в ограниченном узком пространстве, соответствует числу Маха  $M \approx 0,18$ .

2. Течение в тоннеле метрополитена подчиняется теории течения жидкости в трубопроводах. Данное допущение принято на том основании, что отношение гидравлического диаметра тоннеля к длине перегона составляет от 100 до 600. При движении воздушной массы в таком узком пространстве течение можно считать практически одномерным.

3. Воздействие воздушного потока, создаваемого вентиляторными установками, задается в виде расхода воздуха (активного сечения) в плоскости вращения вентиляторов.

4. Нестационарный характер движения циркуляционных потоков учитывается через коэффициент трения воздушной среды.

Физическая картина взаимодействия подземного транспортного средства с воздушной средой представляется следующей [1, 2]. При движении в тоннеле, работая наподобие поршня, поезд приводит в движение воздух тоннеля. Возникающий перед поездом избыток давления расходуется на преодоление воздушного сопротивления в переднем участке тоннеля. Возникающее за поездом разрежение расходуется на преодоление воздушного сопротивления заднего участка тоннеля. Разность давлений перед головным и за последним вагонами поезда вызывает перетекание воздуха вдоль зазора между стенками тоннеля и вагонами, в сторону обратную направлению движения. В то же время сила сопротивления поезда увлекает воздух в зазоре по направлению движения. Взаимодействие этих двух факторов приводит к тому, что в одних случаях в зазоре образуется попутное течение, а других – встречное.

Установим основные соотношения между воздушным сопротивлением поезда и составляющими движения на различных участках тоннеля. Тоннельный воздух набегает на поезд с относительной скоростью

$$v_T = v_0 - c \quad (1)$$

и движется в зазоре с относительной скоростью

$$v_3 = v_0 - \omega, \quad (2)$$

где  $c$  – скорость воздуха в тоннеле (рис.1).

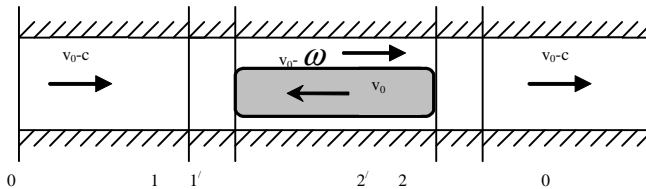


Рис.1 – Скорости относительного движения в тоннеле

Избыточное давление в переднем участке тоннеля  $h_1$  расходуется на преодоление воздушного сопротивления в переднем участке тоннеля, вызванного трением воздуха о стенки этого участка:  $h_1 = \Delta h_{mp1}$ . Разрежение в заднем участке тоннеля  $h_2$  расходуется на: 1) потери напора при входе воздуха в тоннель  $\Delta h_{ex}$ ; 2) преодоление сопротивления трения в заднем участке тоннеля  $\Delta h_{mp2}$ ; 3) компенсацию разрежения, вы-

званного созданием скоростного напора в тоннеле  $h_{ск}$ .

Отсюда, потери напора в тоннеле или, что то же самое, перепад давлений перед головным и за последним вагонами поезда:

$$h_1 - h_2 = \Delta h_{mp1} + \Delta h_{mp2} + \Delta h_{ex} + h_{ск}.$$

Сопротивление трения по длине свободной части тоннеля:

$$\Delta h_{mp} = \Delta h_{mp1} + \Delta h_{mp2}.$$

В связи с тем, что величина  $\Delta h_{mp}$  определяет сопротивление трения от потока воздуха, вызванного движением поезда в тоннеле, можно принять:

$$\Delta h_{mp} = \lambda \frac{L_T - L_n}{D_e} \rho \frac{c^2}{2},$$

где  $D_e = 4 \frac{f}{u}$  – гидравлический диаметр тоннеля, м;  $f$  – площадь поперечного сечения тоннеля,  $m^2$ ;  $u$  – периметр поперечного сечения, м;  $\lambda$  – коэффициент трения воздуха об стенки тоннеля;  $L_T$  – длина тоннеля между станциями, м;  $L_n$  – длина поезда, м;  $\rho$  – массовая плотность воздуха,  $kg \cdot c^2 / m^3$ .

В окончательном виде выражение для потерь напора в тоннеле имеет вид:

$$h_1 - h_2 = \xi_m \cdot \rho \cdot \frac{c^2}{2} = (\xi_{ex} + \xi_{вых} + \xi_{mp}) \cdot \rho \cdot \frac{(v_0 - v_T)^2}{2}, \quad (3)$$

где  $\xi_m = \xi_{ex} + \xi_{вых} + \lambda \frac{L_T - L_n}{D_e}$  – коэффициент полного сопротивления

для данного тоннеля;  $\xi_{ex}, \xi_{вых}$  – коэффициенты местных сопротивлений, вызванных резким изменением конфигурации живого сечения воздушного потока, соответственно, сзади и спереди движущегося состава.

Необходимо отметить, что в работах [1, 4] величины коэффициентов местных сопротивлений предлагаются определять для случаев внезапного сужения и внезапного расширения потока ( $\xi_{ex} = 0,5$ ;  $\xi_{вых} = 1$ ). Такой подход не учитывает перетекания воздуха между параллельными однопутными тоннелями через циркуляционные сбойки. Поэтому величины указанных коэффициентов должны быть конкретизированы для каждого перегона метрополитена.

Разность давлений перед головным и за последним вагонами поез-

да урівноважується опротивленням поезда  $Q_T$  и дополнительными потерями в зазоре  $Q_3$ , следовательно, величина сопротивления воздушной среды при движении поезда в тоннеле определяется выражением

$$Q_T = (h_1 - h_2) \cdot f - Q_3. \quad (4)$$

С учетом (4) и вышеизложенных допущений можно записать:

$$\xi_m = \xi_{вх} + \xi_{вых} + \lambda \frac{l_T - L_n}{D_2} = f(t),$$

где  $\lambda_{нест}$  – коэффициент трения при неустановившемся движении воздуха в тоннеле. Величину  $\lambda_{нест}$  предлагается вычислять

$$\lambda_{нест} = \lambda_{ст} + \Lambda, \quad \Lambda = f\left(\frac{dv}{dt}; \frac{d^2v}{dt^2}\right). \quad (5)$$

Величину  $Q_T$  можно определить из формулы

$$Q_T = f \left[ \xi_T \left( 1 - \frac{v_T}{v} \right)^2 - \xi_3 \left( \frac{v_T}{v} \right)^2 \right] \rho \frac{v^2}{2 \cdot 3,6^2}, \quad \xi_3 = \frac{\alpha(1+\alpha)}{1-\alpha}, \quad (6)$$

где  $\alpha = F / f$  – коэффициент заполнения тоннеля;  $F$  – площадь среднего сечения вагонов, м<sup>2</sup>.

В отличие от [4] в выражении (6) учитывается нестационарный характер движения воздушных масс.

Для учета вентиляционных потоков при расчете суммарного циркуляционного потока, необходимо учесть скорость воздушного потока, индуцированную работающей вентиляционной установкой

$$C_{вент} = \frac{G_{вент}}{f} = \frac{Q_{наб}}{\left( (I_{кон} - I_{нач}) - \frac{Q_{наб}}{4G_{ц}} \right) \cdot f}, \quad (7)$$

где  $G_{ц} \approx G_{общ} - G_{вент}$ ;  $Q_{наб}$  – теплоизбытки в тоннелях, ассимилируемые воздухом, подаваемым системой тоннельной вентиляции;  $I_{кон}$  – конечное, расчетное теплосодержание воздуха в тоннеле в конце расчетного участка станции, со стороны которого поезда входят на станцию, ккал/ч;  $I_{нач}$  – начальное, расчетное теплосодержание наружного воздуха, соответствующее для теплого периода года, ккал/кг.

Тогда основное сопротивление определяется соотношениями:  
- на режиме тяги и электрического торможения

$$\omega_0 = 1,1 + \frac{Q_T}{G_{секц} \frac{m}{2}} ;$$

- на режиме выбега (применительно к вагонам типа Д)

$$\omega_0 = 1 + \frac{52}{G_{секц}} = 0,025v + \frac{Q_T}{G_{секц} \frac{m}{2}}.$$

Результаты расчетов аэродинамических характеристик системы «вагон-тоннель» показали работоспособность предложенного метода. Для примера на рис.2 приведены зависимости сопротивления воздушной среды  $Q_T$  от скорости  $v$  с учетом конкретных значений коэффициента полного сопротивления.

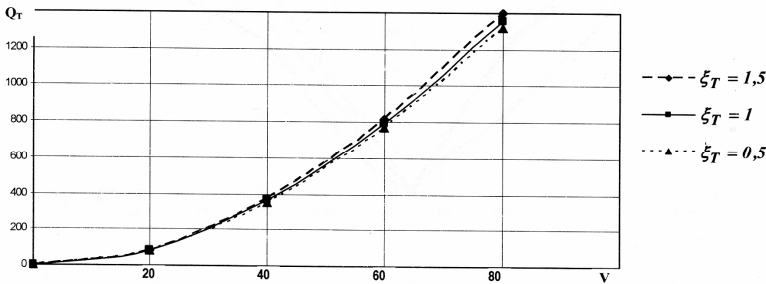


Рис.2

Анализ приведенных на рис.2 данных показывает, что при уменьшении  $\xi_T$  на 0,5  $Q_T$  падает до 3%, а на 1 – до 6%, что уменьшает удельное основное сопротивление движению вагонов.

Таким образом, разработан метод расчета аэродинамических характеристик подземных средств, которая в отличие от известных методов учитывает нестационарный характер циркуляционного потока и влияние вентиляционных потоков в тоннеле. Ряд расчетов, выполненных с помощью данного метода, показывает, что в условиях метрополитена имеется возможность реализовать мероприятия, которые существенно уменьшают удельное сопротивление движению вагонов и обеспечивают тем самым значительное снижение расхода электроэнергии на тягу поездов. В дальнейших работах предполагается провести параметрические исследования влияния основных параметров, определяющих циркуляционное течение в тоннеле, на характеристики подземных транспортных средств.

- 1.Абрамович Г.Н. К расчету воздушного сопротивления поезда на открытой трассе и в тоннеле // Труды ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского. – 1939. – Вып. 400. – 32 с.
- 2.Радченко В.Д. Сопротивление движению вагонов метрополитена. – М.: Недра, 1957. – 70 с.
- 3.Цодиков В.Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. – М.: Недра, 1975. – 313 с.
- 4.Цодиков В.Я. Взаимодействие системы тоннельной вентиляции и поршневого эффекта движущихся в метрополитене поездов // Транспортное строительство. – 1974. – №5. – С.47-49.
- 5.Хэммитт А. Аэродинамика системы вагон-туннель // Ракетная техника и космонавтика. – 1972. – Т.10, №3. – С.56-67.

*Получено 09.11.2011*

УДК 691.3

С.М.ЗОЛОТОВ, канд. техн. наук, КАНААН АЛИ

*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

## **ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ АНКЕРНЫХ КРЕПЕЖЕЙ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Приведен обзор результатов экспериментальных и численных зарубежных исследований стальных анкеров установленных в тяжелый бетон или в бетон в процессе изготовления бетонных конструкций.

Наведено огляд результатів експериментальних та чисельних закордонних досліджень сталених анкерів встановлених у важкий бетон або у бетон в процесі виготовлення бетонних конструкцій.

The review of results of experimental and foreign researches of steel anchors is resulted set in a heavy concrete or in a concrete in the process of making of concrete constructions.

*Ключевые слова:* анкер, анкерные крепления, бетон, прочность, деформативность.

Развитие и совершенствование анкерного крепежа неразрывно связано с фасадным строительством. В Европе появление анкерного крепежа и начало работ по исследованиям в этой области относятся к середине 40-х (фирма «HILTI») и к началу 50-х (фирма «FISCHER») годов XX ст., в Украине широкое распространение анкерного крепежа и начало исследовательских работ относится, в основном, к середине 90-х годов XX ст.

В СССР исследования в области анкерования конструкций (в основном закладных деталей) в монолитный железобетон связаны с оценкой совместной работы арматуры с бетоном при действии на арматурный стержень через закладную деталь продольных и поперечных относительно его оси усилий.

Результаты исследований Г.И. Шапиро, В.И. Ягуста, И.И. Весника [1, 2] позволили разработать методику расчета прочности анкерования деталей при подъеме внутренних стеновых панелей, а также методику